

論文 アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の静的耐荷性状

佐藤昌志*1・西 弘明*2・三上 浩*3・岸 徳光*4

要旨：RC 橋脚の耐震補強工法として，施工が簡便なアラミド繊維製のテープを橋脚に巻き付ける方法を提案し，単一柱形式の橋脚模型を用いて水平単調加力試験によって静的耐荷性状を検討した．本研究では，特に橋脚断面の寸法比，段落しの有無，アラミドテープの補強量に着目して検討を行っている．その結果，(1) アラミドテープの巻き付けによってせん断破壊が防止できる．(2) 曲げ破壊を示す場合でも，巻き付けによる補強量が多い場合には終局変形量が増大し，靱性能の改善効果がみられる．(3) 巻き付けの補強効果は，幅の狭いテープを密に配置した方が高い．などが明らかとなった．

キーワード：耐震補強工法，アラミドテープ，段落し，断面寸法比

1. はじめに

平成 7 年 1 月の阪神・淡路大地震は，近年にない大きな人的，物的被害をもたらした．なかでも，土木建築構造物の被害は甚大であり，今回の地震がこれまでの地震とは異なる特徴をもった地震であったことが報告されている．一方で，今回の災害を契機に各方面で土木構造物の耐震性の再検討ならびに耐震性向上対策に関する研究が活発になされているようである．

本研究は，RC 橋脚の耐震補強工法として施工が簡便なアラミドテープ巻き付け工法を提案し，その耐荷性状を実物橋脚の 1/3 ～ 1/5 模型を用いて，水平単調載荷試験によって検討したものである．特に，RC 橋脚の耐荷性状は断面寸法比，段落しの有無，巻き付け補強の有無及び補強量によって変化すると考えられることより，これらをパラメータとする橋脚模型を製作して検討を行っている．実験の測定項目は，載荷荷重と載荷点及び反対側側面の同一高さに取り付けた変位計による水平変位である．検討は主として荷重－変位関係に着目して行ったが，最後に既往の研究結果 [1] に基づいて提案した巻き付け補強によるせん断耐力の増分の評価式の妥当性を検討した．

2. 実験概要

試験体の一覧を表 1 に示す．試験体は，断面寸法比が 1:1 のものが 4 体，1:2 が 6 体，2:1 が 3 体の合計 13 体である．1:2 の半数及び 1:1 の試験体では，基部から 1/3 以上の高さで鉄筋量の半分を段落した場合について検討した．一方，1:2 の半数と 2:1 では段落しない場合について検討を行っている．各断面寸法は全断面有効とした場合の鉄筋剛性を無視したコンクリート部分の断面 2 次モーメントがほぼ等しくなるように設定した．なお，アラミドテープによる補強はテープの幅，巻き付け間隔，巻き数を変化させて行っており，補強方法は 5 種類である．試験体の名称のうち，第 1 項の N 及び A は各々無補強，アラミド補強を示し，次の数字で断面寸法比を示している．" - " 以後の数字は段落しの有無を示し，アラミド補強した試験体については最後の数字で補強方法を示している．すなわち，

*1 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室長 (正会員)

*2 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室，工修 (正会員)

*3 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員，工博 (正会員)

*4 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科，工博 (正会員)

1) : 幅 37.5 mm のテープを中心間隔 112.5 mm で巻き付けたもの, 2) : 75 mm テープを 112.5 mm 間隔としたもの, 3) : 37.5 mm テープを 75 mm 間隔としたもの, 4) : 3) を 2 層としたもの, 5) : 1) を 2 層としたものである。なお, 表中の補強割合は体積補強割合である。

試験体の形状寸法及び配筋の例を図-1 に示す。柱部の高さはいずれも 100 cm であり, 水平荷重は柱の天端から下方 125 mm の位置で載荷した。試験体の寸法

は 1 : 1 が 40 × 40 cm, 1 : 2 が 33 × 66 cm, 2 : 1 が 48 × 24 cm である。柱基部における軸方向鉄筋 (D16) の鉄筋比は, それぞれ 4.0 %, 3.3 %, 4.2 % とせん断破壊破壊が進行するように大きく設定し, 一方基部で曲げ破壊する場合の終局耐力をほぼ同程度にしている。なお, 帯鉄筋は D16 を載荷点部及びフーチング内部のみに配置した。

巻き付け補強の状況を図-2 に示す。アラミドテープの巻き付け施工は, まず柱部のコーナーを半径 5 mm 程度に面取りし, コンクリー

表-1 試験体の一覧

試験体の名称	寸法比	補強の有無	段落し	テープ補強方法 (mm)		補強割合 (%)	
				幅	間隔		
N11-1/3	1 : 1	なし	1/3				
A11-1/3-1		アラミド補強		37.5	112.5	1層	0.11
A11-1/3-2				75.0	112.5	1層	0.23
A11-1/3-3				37.5	75.0	1層	0.16
N12-0	1 : 2	なし	なし				
A12-0-3		アラミド補強		37.5	75.0	1層	0.15
A12-0-4				37.5	75.0	2層	0.30
N12-1/3	1 : 2	なし	1/3				
A12-1/3-3		アラミド補強		37.5	75.0	1層	0.15
A12-1/3-4				37.5	75.0	2層	0.30
N21-0	2 : 1	なし	なし				
A21-0-1		アラミド補強		37.5	112.5	1層	0.14
A21-0-5				37.5	112.5	2層	0.28

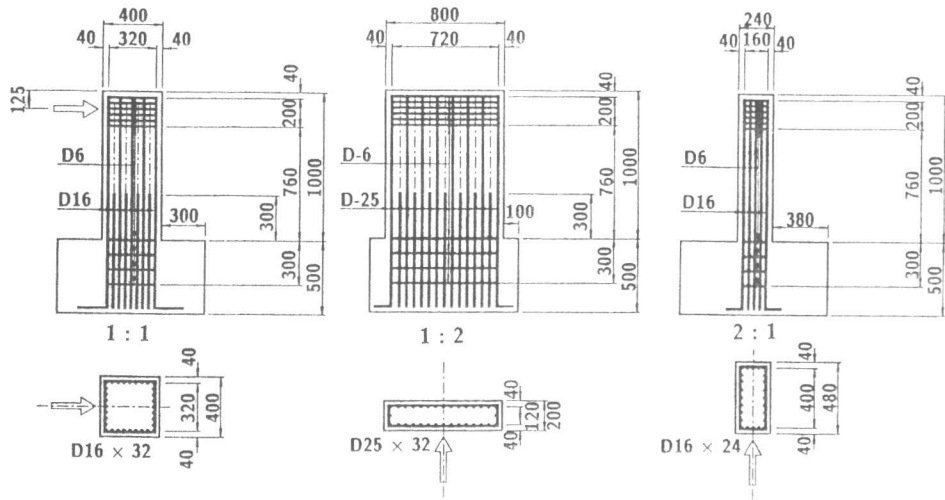


図-1 試験体断面寸法及び配筋図

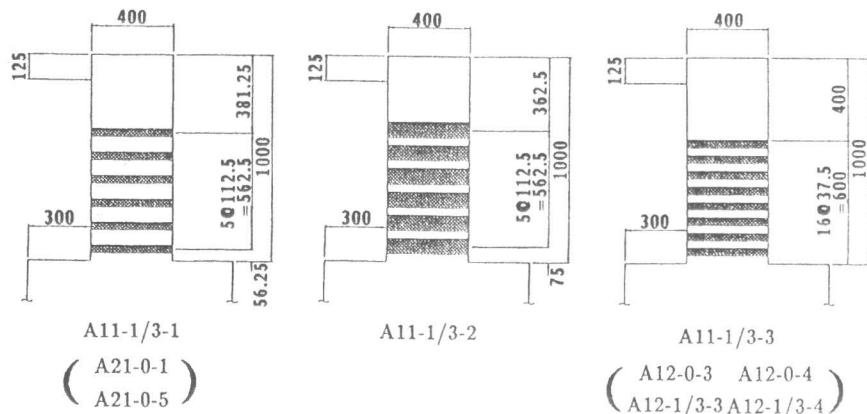


図-2 アラミドテープ巻き付け状況

ト表面をケレン仕上げした後プライマーを塗付し, その後テープを巻き付け, それにエポキシ樹脂を含浸硬化させて成形している。アラミドテープの材料特性 (カタログ値) を表-2 に示す。コンクリート

の圧縮強度は実験時の材令において平均で 260 kgf/cm² であり、鉄筋は全て SD295A である。水平荷重載荷は、厚さ 50 cm の鉄筋コンクリート製剛基礎と一体となった厚さ 150 cm の反力壁に水平力載荷用の油圧ジャッキを取り付けて行った。油圧ジャッキにはロードセルを取り付け、ロードセルと試験体の間に球座を挿入して変形に追従できるようにした。また、フーチング天端に変位計を取り付け完全固定状態に近いことを確認した。なお、載荷は変位量が最大で 40 mm 程度までとした。

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重-変位関係

図-3 ~ 6 に荷重と載荷点位置の変位の関係を示す。図-3 は段落しを行った 1:1 試験体の結果である。無補強の N 11-1/3 では荷重が 7 tf 及び 17 tf 程度で勾配の変化がみられ、その後 22 tf 程度で最大荷重を示した後急激に耐力低下して破壊に至っている。

一方、アラミド補強した試験体ではいずれも耐力及び変形量が大きく増加し、ほぼ一定の荷重レベルで変形量が增大する塑性域を示している。A 試験体の終局変位量は 40 mm 程度であり、N 試験体の 3 倍程度と大きい。A 試験体の最大荷重は N に比べて補強 1 (補強割合 0.11%) で 4.9 tf、補強 2 (0.23%) で 7.1 tf、補強 3 (0.16%) で 8.0 tf 程度大きい。いずれも曲げ破壊であったため、せん断耐力の増加はこの数値以上であるものと考えられる。なお、体積補強割合が最も大きい補強 2 の耐力の増加よりも補強 3 が大きいのは、幅の狭いテープを密な間隔で配置した方が補強効果が増大した既往の実験結果 [1] と符合している。

図-4 ~ 5 に 1:2 試験体の荷重-変位関係を示した。図-4 で段落しのない場合について比較した。N 12 は P = 23 tf 程度で剛性が若干変化したものの最大荷重 29.8 tf までほぼ直線的に荷重が増加し、その後急激に耐力が低下している。一方、A 12-0-3 は勾配が 28 tf 程度で急変するが、荷重がさらに増加し最大荷重約 35 tf と後述する計算曲げ耐力程度でテープがコーナー部で破断して破壊した。そのため、終局変位量は約 20 mm と小さく、破壊はやや脆性的である。A 12-0-4 は、補強割合が A 12-0-3 の 2 倍であることより、A 12-0-3 と同様に p = 29 tf 程度で剛性が大きく変化 (以後、剛性変化点と称する) した後、

表-2 アラミドテープの材料特性

	弾性係数 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	厚さ (mm)
テープ1層	11,100	29,000	0.306
	弾性係数 × 断面積 E · A (tf)	引張耐力 (tf)	厚さ (mm)
37.5 mm 幅 1層	127.4	3.3	0.306
37.5 mm 幅 2層	254.7	6.7	0.612
75.0 mm 幅 1層	254.7	6.7	0.306

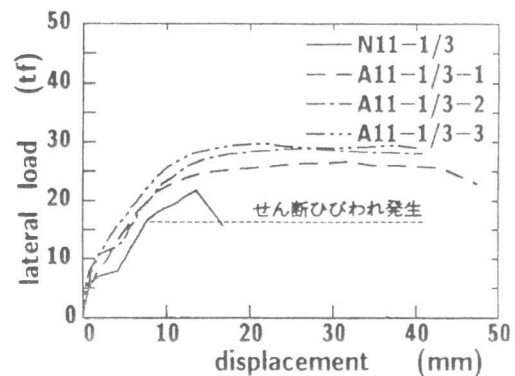


図-3 N11-1/3 及び A11-1/3 試験体の荷重-変位曲線

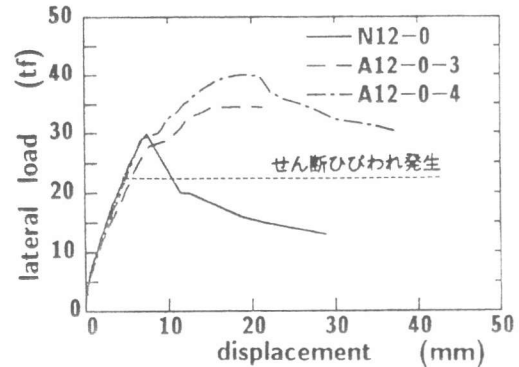


図-4 N12-0 及び A12-0 試験体の荷重-変位曲線

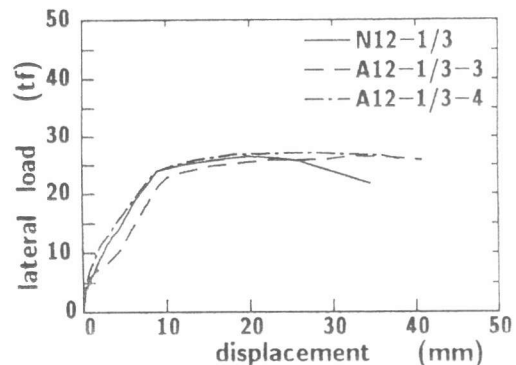


図-5 N12-1/3 及び A12-1/3 試験体の荷重-変位曲線

荷重はさらに増加し約 40 tf に達した後に徐々に低下しているが、最終的に約 37 mm の変位を示した。

図-5 に段落しのある 1:2 試験体の実験結果を示す。いずれも荷重-変位関係から曲げ破壊していることが分かる。また、最大耐力は段落し部で破壊するときの計算曲げ耐力 ($p = 28.0 \text{ tf}$) とほぼ対応している。ただし、N12 が変位量 20 mm 程度から荷重が低下しているのに対し、アラミド補強した A12 試験体では終局の 40 mm 程度まで顕著な荷重の低下はみられない。すなわち、曲げ破壊する試験体でも補強することによって変形性能を改善できることが分かる。

図-6 に 2:1 試験体の荷重-変位関係を示す。N21 試験体では、 $p = 7 \text{ tf}$ 、 $p = 22 \sim 23 \text{ tf}$ 近傍で小さな勾配の変化がみられるが、荷重はほぼ直線的に増加し、 $p = 31 \text{ tf}$ (変位約 12 mm) 程度で最大を示した後に急激に低下している。一方、A21-0-1 では N21 と同様に $p = 7 \text{ tf}$ 、 22 tf 程度で勾配の変化がみられるものの、荷重はほぼ直線的に増加し変位 16 mm 程度で最大荷重 $p = 36.7 \text{ tf}$ を示した後、荷重が若干低下して変位量約 23 mm でコーナー部のテープの破断によって破壊している。靱性は N21 に比べて改善されているものの破壊はやや脆性的である。

A21-0-5 は、 $p = 7 \sim 8 \text{ tf}$ で勾配の変化がみられるが、その後荷重は直線的に増加して $p = 35 \text{ tf}$ 程度で明瞭な剛性変化点を示している。その後、ほぼ線形的な荷重-変位関係を保持し、約 40 mm の最大変位量を示した。なお、最大荷重は 37 tf である。A21-0-1 と -5 はテープの巻き付け層数が 1 層、2 層で、補強割合が -5 の方が 2 倍大きい。巻き付け層数は曲げ耐力の増加に顕著な影響を与えていない。しかし、最大変位量に着目すると、2 層の方が 2 倍程度大きくなっており、大幅に変形性能を改善していることが分かる。

3.2 終局耐力及び破壊形式

表-3 に全試験体の実測耐力と無補強試験体の計算耐力及び破壊形式を示した。曲げ耐力の計算は断面分割法によって行い、実測のコンクリート強度及び鉄筋の規格値を基に解が一定して得られる分割数以上として 5 mm 厚の 66 分割以上で行った。段落しがある場合には段落し部の曲げ耐力が基部のそれよりも小さいため、段落し部の曲げ耐力を示している。せん断耐力は側方筋を無視し、図-8 に示すひびわれ状況を基に見かけの載荷スパン a_v を決定してディープビームとして計算した。ただし、実験結果と比較するために部分安全係数は考慮していない。

表より、無補強試験体の実測耐力は計算せん断耐力を上回り、N11 を除きむしろ計算曲げ耐力に近くなっていることが分かる。これは、側方筋がせん断耐力の向上に大きく寄与していることを意味していると考えられる。アラミドテープを巻き付けた際のせん断補強効果を定量的に検討するためには、試験

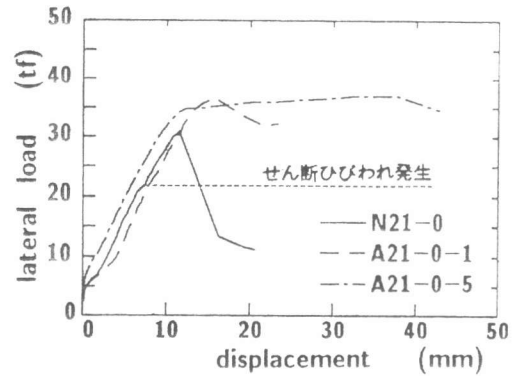


図-6 N21-0 及び A21-0 試験体の荷重-変位曲線

表-3 実測耐力と計算耐力及び破壊形式

試験体の名称	耐力 (tf)				破壊形式
	計算値		実測値		
	曲げ耐力	せん断耐力	剛性変化点	終局耐力	
N11-1/3	27.7	16.7	16.8	21.8	せん断
A11-1/3-1	-	-	-	26.7	曲げ
A11-1/3-2	-	-	-	28.9	曲げ
A11-1/3-3	-	-	-	29.8	曲げ
N12-0	35.4	21.6	23.0	29.8	せん断
A12-0-3	-	-	-	34.6	曲げ・せん断
A12-0-4	-	-	-	40.0	曲げ
N12-1/3	28.0	21.6	-	26.5	曲げ
A12-1/3-3	-	-	-	26.5	曲げ
A12-1/3-4	-	-	-	27.1	曲げ
N21-0	29.5	22.6	22.0	30.9	せん断
A21-0-1	-	-	-	36.7	曲げ・せん断
A21-0-5	-	-	-	37.0	曲げ

体の破壊形式を特定する必要がある。本試験では、曲げとせん断のひびわれが混在しひびわれ性状からは破壊の形式を特定しにくい場合もあるため、荷重-変位曲線を基に破壊形式を特定した。すなわち、荷重が単調増加してピークに達した後急激に減少した場合をせん断破壊、明瞭なピークは示さないものの塑性域が狭いものを曲げ・せん断破壊、塑性域が 40 mm 程度までに広がったものを曲げ破壊と定義した。

3.3 せん断耐力の増加に関する検討

既往の研究 [1] では、断面寸法が 25 × 25 cm、スパンが 62.5 cm の側方筋のない RC 柱にアラミドテープを巻き付けてせん断耐力の増加を検討している。その結果をコンクリート標準示方書の V_{sd} 式に対応させると、アラミドテープの巻き付けによるせん断耐力の増分は下式によって与えられる。

$$V_{sd} = \{ A_w \cdot f_P \cdot \gamma \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha) / s \} \cdot Z \quad \dots (1)$$

ここに、 V_{sd} : アラミドテープ巻き付けによるせん断耐力の増分 (kgf)

A_w : アラミドテープの断面積 (cm^2)

α : 巻き付け方向と部材軸のなす角度

f_P : アラミドテープの引張強度 ($29,000 \text{ kgf/cm}^2$)

s : アラミドテープの巻き付け間隔 (cm)

γ : 低減定数 (0.3)

Z : 柱高さの 1 / 1.15 (cm)

式 (1) は、側方筋のない柱模型の実験結果に基づくものであり、本研究のように多数の側方筋を用いた試験体の実験結果とそのまま対応させることはできない。そこで、無補強の実験結果の荷重-変位関係の剛性変化点と計算せん断耐力がほぼ合致し、かつせん断ひびわれが明瞭に発生あるいは進展したことから、剛性変化点以後の耐力増加をせん断耐力の増分と評価して式 (1) と比較した。結果を図 7 に示す。

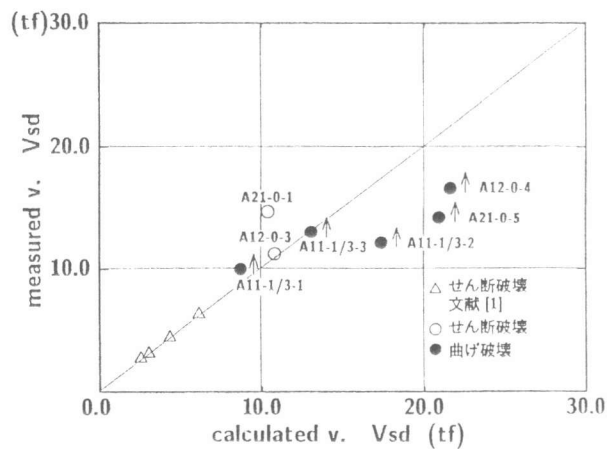


図 7 計算値と実測値の関係

V_{sd} の計算値が 20 tf 程度と大きい場合には曲げ破壊を示しているために、せん断耐力の増分を明確には把握できない。一方、 V_{sd} が 10 tf 程度までの結果から、式 (1) は今回の試験体のように大きな断面寸法及び断面寸法比が 1 : 1 以外の場合においても比較的精度良くテープの巻き付けによるせん断耐力の増加を評価できる可能性が示唆されている。

3.4 ひびわれ性状

図 8 にひびわれ性状の例を示す。図より、無補強の試験体では全般的に載荷側から反対側の基部のコーナーに向かって斜めひびわれが対角線上に発生及び進展していることが分かる。特に、N 12 - 0 では斜めひびわれの本数が多く、載荷点付近及び柱の中央付近から斜め下方にひびわれが進展している。

一方、N 12 - 1/3 のように段落しがある場合には、上述した斜めひびわれの他に段落し部 ($h = 30 \text{ cm}$) に水平に生じる曲げひびわれや、それが断面の中央付近から斜め下方に進展する曲げ・せん断型のひびわれが生じている。N 21 - 試験体では幅の広い斜めひびわれが載荷側の柱高さの中心付近から対角線上に基部のコーナーに向かって明瞭に進展している。このように、無補強の試験体のひびわれは載荷側より対角線上に基部のコーナーに向かって進展し、棒部材に生じる斜めひびわれと性状を異にしている。このため、ディープビームとして計算したせん断耐力と、せん断ひびわれが発生又は大きく進展した時点の荷重がほぼ対応したものと考えられる。一方、アラミドテープを巻き付けた試験体では、載荷側から反対

側に向かって斜め下方に多数のひびわれが発生及び進展している。ただし、無補強と異なり、全ての斜めひびわれが基部のコーナーに向かって進展しているわけではない。また、テープにそって水平方向に多数のひびわれが発生している。

このように、アラミドテープの巻き付けによって斜めひびわれが広域的に分散し、曲げひびわれを多数誘発することが荷重-変位関係を大きく変化させた理由であると考えられる。

4. まとめ

RC 橋脚の耐震補強工法としてアラミドテープ巻き付け工法を提案し、断面寸法比、段落し

の有無、アラミドテープの体積補強割合を変化させて水平単調加力試験によって耐荷性状を検討した。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 無補強ではせん断破壊する試験体でも、アラミドテープ巻き付けによってせん断破壊を防止できる。
- (2) 曲げ破壊する試験体でも、テープの巻き付け数を多くすることで靱性能が改善される。
- (3) 巻き付けを行う場合には、幅の広いテープよりも狭いテープを密に配置した方が効果的である。
- (4) アラミドテープの巻き付けによるせん断耐力の増分を、提案した式で比較的精度良く推定できる可能性が示唆されたが、今後よりせん断破壊型の実験で検証する必要がある。

本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科の松岡健一教授ならびに大学院生の大山高輝君、亀石暁君をはじめとする構造力学講座の皆様にも多大なるご支援を頂きました。また、アラミドテープの巻き付けはショーボンド建設(株)の皆様にご支援を頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 浅倉晃, 岡本直, 谷垣正治, 山田稔: 高強度繊維巻き付けによる既存 RC 柱のせん断補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 1, pp.1061 - 1066, 1994.

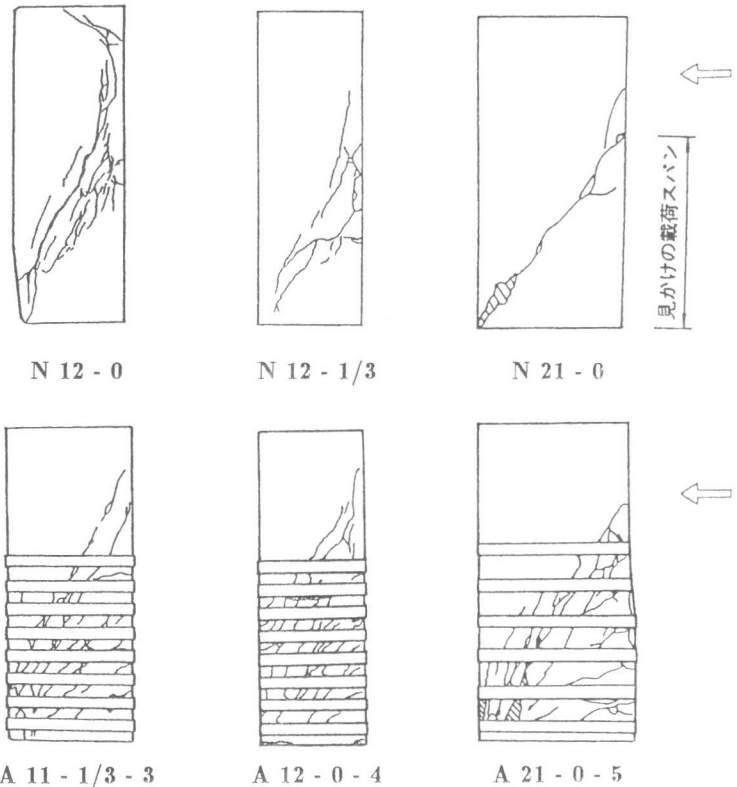


図-8 ひびわれ性状